

4. Гуцин В. Н. Технические решения по управлению потоками расплава в промежуточных ковшах МНЛЗ / В. Н. Гуцин, В. А. Ульянов, В. А. Васильев // *Металлург*. 2010. № 9. – С. 45–47.

УДК 669.051

**Е. Г. Дмитриева, Е. В. Братыгин, Д. С. Пешкин**

ОАО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСНОВНОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ АГЛОШИХТЫ И КАЧЕСТВО АГЛОМЕРАТА**

### **Аннотация**

*В статье представлены результаты исследований процессов окомкования и агломерации железорудного концентрата месторождения Тебинбулак, Узбекистан. Рассмотрено влияние основности шихты и содержания твердого топлива в ней на газопроницаемость слоя и качество агломерата. Представлено новое выражение для расчета коэффициента газодинамического сопротивления шихты, которое позволяет оценить качество окомкования и производительность агломерационной установки. Установлено, что при изменении содержания твердого топлива от 60,0 до 65,0 кг/т агломерата и основности от 2,0 до 2,4 повышение  $C_{ш}$  приводит к снижению газопроницаемости, а  $B$  – к увеличению. Получены регрессионные уравнения для сопротивления слоя и качества агломерата. Таким образом, приведенный в работе метод расчета коэффициента газопроницаемости позволяет оценить влияние различных факторов на агломерацию.*

*Ключевые слова: железорудный концентрат, месторождение Тебинбулак, агломерация, окомкование, спекание, качество агломерата, газопроницаемость, основность.*

### **Abstract**

*In article results of researches of pelletizations and sintering of iron ore concentrate from Tebinbulak, Uzbekistan. The influence of basicity of charge and content of solid fuel in it on the permeability of the layer and the quality of agglomerate. Presents a new expression for calculation of the gas-dynamic coefficient of resistance of a charge that has allowed to evaluate the quality of work and productivity of the sintering plant. It is established that the change of the content of solid fuel from 60,0 to 65,0 kg/t of sinter and basicity from 2,0 to 2,4 improving  $C_{sh}$  leads to decreasing of  $B$  and to increase. The obtained regression equations for the resistance of the layer and quality of agglomerate. Thus, resulted in the method of calculation of the coefficient of permeability allows to estimate the influence of different factors on agglomeration.*

*Keywords: iron ore concentrate, Tebinbulak, sintering, quality of agglomerate, permeability of the layer, basicity.*

Известно, что на сегодняшний день агломерационный процесс является самым производительным и экономичным способом получения офлюсованного сырья для доменной

плавки, а также для попутной утилизации многих отходов металлургического производства. В свою очередь, эффективность производства и качество железорудного агломерата в значительной степени определяются свойствами окомкованной шихты – гранулометрическим и химическим составом, а также прочностью полученных гранул, загружаемых на агломерационную ленту.

Общепринятым в отечественной и зарубежной литературе является следующее понимание механизма формирования гранул [1]:

- частицы крупнее 1,0–1,5 мм выступают в качестве зародышей окомкования;
- вследствие молекулярных или капиллярных сил, возникающих при увлажнении, на них налипают ультрадисперсные частицы (–0,05 мм);
- на сформировавшийся слой ультрадисперсных частиц накатываются частицы размером 0,05–0,4, иногда до 0,5 мм;
- фракция промежуточного размера (0,4–1,0 мм) считается проблемной, поскольку такие частицы малы, чтобы выступать в качестве центров окомкования, но велики для налипания на поверхность зародыша. Кроме того, частицы данного размера являются первой критической фракцией для шихты со средним диаметром  $d_{ш} = 3–4$  мм [2] и поэтому определяют ее газодинамические свойства.

Для выявления основных факторов, влияющих на выход фракции –1 мм, после процесса окомкования был проведен ряд исследований, в частности, было установлено, что наиболее сильное влияние на гранулометрический состав шихты оказывает влажность [3; 4]. Однако влажность шихты или расход воды на окомкование является обычно заданным параметром и в промышленных или лабораторных условиях поддерживается постоянным. Поэтому представляет интерес определить влияние других факторов на процесс окомкования, в частности, основности шихты и содержания твердого топлива в ней.

Для описания потерь давления в слое  $\Delta P$ , Па используют различные интерпретации общего для всех сыпучих материалов закона Дарси, описывающего канальное течение газа при наличии трения в канале, например в виде уравнения Дарси-Вейсбаха [2]:

$$\Delta P = \xi_{сл} \frac{w_{\phi}^2}{2} \rho \frac{\Delta H}{d_{эКВ}}, \quad (1)$$

где  $\xi_{сл}$  – коэффициент гидравлического сопротивления слоя;  $w_{\phi}$  – начальная скорость фильтрации (скорость фильтрации на свободное сечение), м/с;  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – высота слоя, м;  $d_{эКВ}$  – эквивалентный диаметр частиц, м.

Для данного исследования было выбрано уравнение, описывающее газодинамику слоя при ламинарном течении ( $200 < Re < 1000$ ), где  $\xi_{сл}$  заменяется коэффициентом газопроницаемости слоя  $K$ , м<sup>2</sup>/(Па·с) [5]:

$$\Delta P = \frac{\mu \Delta H w_{\phi}}{K} = \frac{\pi \mu \Delta H w_{\phi}}{8 \varepsilon d_{эКВ}^2}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость газа, Па·с;  $\varepsilon$  – порозность слоя.

В результате преобразования выражения (2) было получено выражение для определения  $K$ :

$$K = \frac{3,14 \varepsilon d_{эКВ}^2}{8 \mu} = \frac{w \Delta H}{\Delta P}, \quad (3)$$

Использование коэффициента  $K$  позволяет разделить уравнение (1) на две части – одну, описывающую гранулометрический состав шихты (диаметр частиц, порозность слоя) и вто-

рую, которая характеризует технологические факторы (высоту слоя, скорость фильтрации). В уравнении (2) коэффициент сопротивления слоя – коэффициент газопроницаемости – имеет четкий физический смысл – он показывает потери напора на каждый метр слоя при заданном расходе газа и четко характеризует изменение газопроницаемости слоя при изменении его гранулометрического состава. Впервые данный коэффициент был введен и рассчитан авторами [5] для доменных шихт, в частности, для агломерата и окатышей.

Коэффициент газопроницаемости достаточно просто определяется экспериментально, поэтому представляет интерес использовать его как показатель качества окомкования шихты. Это позволило бы установить требования к величине и допустимым отклонениям гранулометрического состава шихты. Возможность применения предложенного коэффициента газопроницаемости для оценки сопротивления слоя была проверена в серии предварительных опытов, проведенных на одинаковом диаметре частиц слоя. Обработка полученных экспериментальных данных показала адекватность предлагаемого расчетного выражения (3) – значение критерия Фишера при  $P = 0,95$  (7,69) получилось ниже критического значения (9,55).

Опыты по определению влияния основности шихты  $B = \text{CaO/SiO}_2$  и содержания твердого топлива в шихте  $C_{\text{ш}}$  на процесс окомкования и качества агломерата проводились на базе научно-исследовательской лаборатории ОАО «Уралмеханобр». В качестве железорудного компонента шихты был использован концентрат Тебинбулакского месторождения, Узбекистан. Для определения степени влияния основности и содержания топлива в шихте на газопроницаемость шихты и содержание класса –1 мм в окомкованной шихте был составлен план проведения опытов, по которому основность изменялась от 2,0 до 2,4, содержание топлива в шихте – от 60,0 до 65,0 кг/т агломерата.

Шихту для опытов окомковывали в тарельчатом окомкователе диаметром 0,85 м и скоростью вращения 17 об/мин, конечная влажности шихты составляла 9 %, кокс добавляли в конце процесса окомкования. Содержание возврата во всех опытах было 30 %, промпродукта 20 %, остальные компоненты дозировали в соответствии с заданной основностью и содержанием твердого топлива. Для определения качества получаемого агломерата окомкованную шихту загружали в лабораторную чашу диаметром 100 мм, высота слоя во всех опытах составляла 350 мм, разрежение под слоем шихты поддерживали постоянным, равным –3,0 кПа. Во время проведения опытов измеряли скорость фильтрации воздуха на свободное сечение перед спеканием и во время него, температуру воздуха на входе в слой шихты и агломерата, температуру по высоте слоя и в отходящих газах. Результаты исследований представлены в табл. 1. Для повышения точности коэффициент газопроницаемости  $K$  рассчитан по выражению (3) через порозность и эквивалентный диаметр частиц шихты.

Как видно из полученных данных, величины  $K$  и  $m_{-1}$  прямо зависят от содержания твердого топлива – при увеличении его содержания доля мелочи растет, а газопроницаемость слоя падает. Падение газопроницаемости при росте  $C_{\text{ш}}$  связано, в первую очередь, с гидрофобными свойствами частиц кокса – его угол смачивания  $\theta$  в 3,5 раза больше чем для концентрата (68,18 и 19,14° соответственно [7]), т. е. у кокса увлажняются только частицы больше 3,5–4,0 мм, а остальные частицы остаются не окомкованными и располагаются между окомкованными частицами шихты, снижая ее газопроницаемость. Причем порозность самого слоя может как увеличиться, так и снизиться при добавке неомкующейся фракции, так как она больше зависит от соотношения количества самой крупной фракции и самой мелкой, а не только от количества фракции  $m_{-1}$  [2].

Таблица 1

Значения параметров шихты и агломерата по результатам опытов

Параметры	Ед. изм.	Содержание топлива в шихте, кг/т агл.	Основность шихты, доли		
			2,0	2,2	2,4
Средний диаметр шихты $d_{\text{с}}$	мм	60,0	3,32	3,64	3,49
		62,5	3,24	3,65	3,48
		65,0	2,75	3,85	3,01
Содержание класса – 1 мм в шихте $m_{-1}$	%	60,0	6,23	4,31	4,63
		62,5	7,95	5,03	5,82
		65,	11,98	8,93	9,29
Порозность слоя $\varepsilon$	доли	60,0	0,423	0,433	0,432
		62,5	0,414	0,416	0,416
		65,0	0,413	0,427	0,444
Скорость фильтрации $w_{\text{ф}}$	м/с	60,0	0,8	0,75	0,85
		62,5	0,7	0,7	0,75
		65,0	0,5	0,55	0,6
Коэффициент газопроницаемости $K$	$\text{м}^2/(\text{Па} \cdot \text{с})$	60,0	0,069	0,085	0,092
		62,5	0,059	0,07	0,077
		65,0	0,043	0,059	0,063
Удельная производительность $g$	$\text{т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	60,0	0,92	0,92	0,9
		62,5	0,94	1,03	0,97
		65,0	0,97	1,05	0,99

С другой стороны, абсолютные значения газопроницаемости шихты при увеличении основности становятся выше, так как угол смачивания известняка в 9,6 раза меньше, чем у концентрата (2,00 и 19,14° соответственно [7]), поэтому добавка флюса любой фракции повышает комкующую способность частиц шихты и снижает количество некомкующейся фракции.

В результате обработки результатов опытов была получена регрессионная зависимость коэффициента  $K$  от  $B$  и  $C_{\text{ш}}$ :

$$K = 0,327 - 0,0057C_{\text{ш}} + 0,042B, R = 0,92. \quad (5)$$

Коэффициент взаимного влияния  $B$  и  $C_{\text{ш}}$  был исключен после проверки значимости по критерию Стьюдента. Оценка адекватности модели по критерию Фишера показала достоверность полученных регрессионных коэффициентов.

Знаки перед коэффициентами в уравнении (5) соответствуют физическому влиянию факторов, представленному в табл. 1. Действительно, в заданном диапазоне изменения входных параметров модели основное влияние на газопроницаемость шихты оказывает содержание твердого топлива в шихте – его увеличение всего на 1,0 кг/т агл. приводит к падению газопроницаемости слоя на 8,3%. Влияние основности сказывается в меньшей степени: ее изменение на 0,1 ед. приводит к росту газопроницаемости на 6,3 %. Можно предположить, что

при существенном изменении основности шихты ее влияние на газодинамические свойства шихты будет выше.

Проанализируем теперь взаимосвязь газопроницаемости шихты и качества спекания. В качестве основного параметра, характеризующего протекание процесса агломерации, была использована удельная производительность аглоустановки  $g$ , т/(м<sup>2</sup>·ч).

На рис. 1 представлена зависимость производительности аглоустановки от газопроницаемости слоя, отнесенной к среднему диаметру шихты (кривые построены по данным табл. 1). Как видно на рисунке, зависимость  $g$  от критерия  $K/d_{ш}$  имеет обратную пропорциональность в выбранной области проведения эксперимента, высота расположения линий определяется основностью шихты.

Данная зависимость описывается уравнением:

$$g = 0,566 - 0,0227(K/d_{ш}) + 0,41B. \quad (6)$$

Оценка адекватности модели по критерию Фишера также показала достоверность полученных регрессионных коэффициентов, коэффициент корреляции между экспериментальными и расчетными данными  $R = 0,96$ .

Учитывая тесную связь коэффициента газопроницаемости с параметрами слоя –  $\Delta P$  и  $H$ , можно сказать, что качество агломерата связано как с физико-механическими свойствами шихты, так и с общим перепадом давления газа по высоте слоя, определяющим скорость фильтрации воздуха и скорость процесса спекания. Увеличение содержания класса –1,0 в шихте, вызванное повышением концентрации твердого топлива в ней, приводит к падению коэффициента  $K$  и снижению скорости спекания. Однако уменьшение высоты зоны спекания и, как следствие, повышение температуры в ней способствуют более глубокому проплавлению шихты и увеличению прочности готового агломерата, поэтому удельная производительность возрастает (табл. 1) при изменении расхода твердого топлива от 60,0 до 65,0 кг/т агл.

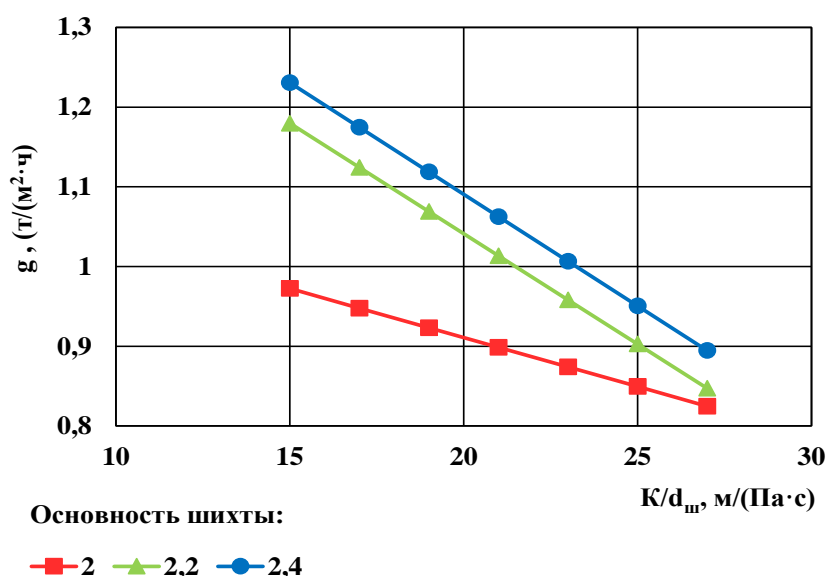


Рис. 1. Зависимость удельной производительности аглоустановки от критерия  $K/d_{ш}$  при различной основности

Можно предположить, что при дальнейшем увеличении содержания класса –1,0 мм в окомкованной шихте газопроницаемость слоя снизится до значения, при котором станет за-

труднено или невозможно поступление необходимого количества воздуха для горения твердого топлива, и процесс агломерации прекратится. Проведенные расчеты показали, что процесс агломерации становится неустойчивым уже при  $m_{-1} = 40,0 \dots 50,0 \%$  ( $K = 0,022-0,02$ ), увеличение содержания класса  $-1,0$  мм свыше  $50,0 \%$  делает спекание шихты практически неосуществимым (в лабораторных условиях). Для определения предельных величин  $m_{-1}$  и  $K$  в промышленных условиях требуется проведение дополнительных исследований.

Таким образом, проведенные исследования показали, использование комплексного коэффициента газопроницаемости слоя  $K$ , рассчитанного по выражению (3), позволяет оценить качество процесса окомкования и производительность аглоустановки. Установлено, что повышение  $C_{ш}$  приводит к увеличению сопротивления слоя, а увеличение основности – к росту газопроницаемости шихты при постоянном расходе воды на окомкование. Дальнейшие исследования позволят расширить область применения коэффициента газопроницаемости  $K$  за счет определения влияния других факторов на комкующую способность шихты и производительность агломашин.

### Список использованных источников

1. Коротич В. И., Пузанов В. П. Газодинамика агломерационного процесса. М: Металлургия, 1974. 208 с.
2. Братчиков С. Г. Теплотехника окускования железорудного сырья. М: Металлургия, 1970. 344 с.
3. Результаты модернизации узлов увлажнения шихты на машинах аглопроизводства / Дмитриева Е. Г., Вяткин А. А., Малыгин А. В. и др. // Сталь. № 2. 2009. С. 4–6.
4. Алешин Е. А. Математическая модель зависимости газопроницаемости шихты от ее влажности в процессе производства агломерата // Вестник ЮУрГУ. № 2. 2010. С. 37–40.
5. Коэффициент газопроницаемости при ламинарном течении газа как обобщенная характеристика гранулометрического состава шихты / А. Д. Учитель, Б. В. Боклан, Е. Г. Донсков, В. И. Засельский // Известия вузов. Черная металлургия, 1984. С. 26–28.
6. Теплотехнические методы анализа агломерационного процесса / В. И. Клейн, Г. М. Майзель, Ю. Г. Ярошенко, А. А. Авдеенко. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2004. – 224 с.
7. Фоменко С. И., Ростовский В. И. Влияние смачиваемости шихтовых материалов на выбор технологии их подготовки // Известия вузов. Черная металлургия, 1987. – С. 149.